

## **Estado del arte del proyecto: “Evaluación de métodos empleados en el análisis de factibilidad de propuestas para el mejoramiento de la eficiencia energética de motores trifásicos.”**

**Autores: VLADIMIR SOUSA SANTOS - JUAN CABELLO ERAS - ALEXIS SAGASTUME GUTIERREZ.**

### **Resumen:**

El proyecto de investigación que se propone tiene como propósito evaluar los métodos empleados en el análisis de factibilidad de propuestas, para el mejoramiento de la eficiencia energética en motores trifásicos (MTs). El proyecto se fundamenta en la necesidad de mejorar la eficiencia operacional de los MTs, pues estos representan casi el 50% del consumo de energía eléctrica mundial y son los mayores consumidores de energía eléctrica en el sector industrial. En la literatura científica se reportan varios estudios de factibilidad de propuestas para el mejoramiento de la eficiencia en estos equipos. Estos análisis, sin embargo, se basan en métodos de estimación que no consideran aspectos relevantes de la operación de los MTs, como las condiciones reales de carga y de suministro eléctrico, que pueden implicar errores significativos en la evaluación del impacto de las medidas propuestas. En el presente proyecto estos métodos se evaluarán experimentalmente en las cuatro etapas siguientes. En la primera etapa, se evaluarán los métodos de estimación de la eficiencia en MTs de diferentes tecnologías y niveles de eficiencia, operando en regímenes variables de cargas y de suministro eléctrico. En la segunda etapa, se evaluarán los métodos empleados para la estimación del ahorro de energía por el uso de VDV's, en un entorno de operación que simula condiciones reales. En la tercera etapa, se contempla el análisis de la eficiencia operacional de los MTs alimentados desde sistemas fotovoltaicos (SFs), donde se presentan nuevos escenarios en el suministro eléctrico, que deben de considerarse en los análisis de factibilidad. En la cuarta y última etapa, se analizarán los resultados, y se determinarán aspectos que deben de mejorarse en los análisis de factibilidad de propuestas para el aumento de la eficiencia energética en MTs. El proyecto se realizará en conjunto con investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Occidente (Acreditada), y las evaluaciones experimentales se desarrollarán en laboratorios especializados de esta institución. Los resultados del proyecto se prevén publicar en cuatro artículos científicos en revistas de alto impacto, y servirán de base para la propuesta de un proyecto nacional e internacional de mayor alcance, sobre el desarrollo de nuevas herramientas y métodos, para el mejoramiento de la eficiencia energética en motores eléctricos.

### **Marco teórico:**

Los principales métodos de estimación de la eficiencia en MT son el método de placa [12], el método del deslizamiento [14], el método de la corriente [11] y el método del torque en el entrehierro [21]. Otros métodos son los basados en la estimación de parámetros empleando técnicas de inteligencia artificial [29]–[33]. El método de placa consiste en la obtención, a partir de los datos de placa y de catálogo, de un modelo de regresión lineal de la potencia mecánica en función de la potencia eléctrica [14]. Esto permite estimar la potencia mecánica a partir de la potencia eléctrica medida y con estos parámetros, se calcula el factor de la carga

y la eficiencia del MT. El método de la corriente considera que la variación de carga es directamente proporcional a la relación entre la corriente medida y la corriente nominal [13]. En el método del deslizamiento se considera que la variación de la relación entre el deslizamiento del motor medido y el deslizamiento nominal del motor es lineal con la variación de la carga [13]. El método del momento en el entrehierro consiste en obtener el momento electromagnético directamente a partir de las mediciones de tensiones, corrientes y la resistencia de los devanados del estator. Con este resultado, se estima la potencia mecánica considerando las pérdidas en vacío como un 3.5% de la potencia de salida nominal, y las pérdidas adicionales como un 1.8% de la potencia de salida nominal [9]. Los métodos basados en inteligencia artificial utilizan algoritmos de solución altamente complejos, que requieren largos tiempos de procesamiento y altas capacidades computacionales, que limitan su aplicación en la obtención de resultados en tiempo real [2], por esta razón no será evaluados en este proyecto. En este proyecto se analizarán, además, los efectos del desequilibrio de tensión y los armónicos en la operación de los MT. El interés en estos dos problemas de calidad de la energía se debe a que son los problemas que más se presenta en las industrias [24]. El desequilibrio de tensión, se pone de manifiesto cuando las tensiones de línea difieren en magnitud [54]. Entre las causas del desequilibrio de tensión se encuentra las fuentes de suministro inestable o desequilibradas, la desigual distribución de las cargas, la transposición incompleta de las líneas, transformadores conectados en bancos asimétricos, entre otros. El desequilibrio es provocado por el mismo motor cuando existe una asimetría en el esquema de conexión de los enrollados, en las impedancias de los circuitos del estator y del rotor, o la ausencia de contacto en el circuito de una de las fases del rotor o la ruptura de una o varias barras de la jaula del rotor [55]. Cuando el motor se alimenta desde una fuente con tensiones desequilibradas, el campo magnético resultante es elíptico, debido a que las componentes de secuencia positiva y negativa de las corrientes generan sus propias ondas de fuerza magnetomotriz, estableciendo campos que giran en sentido contrario uno con respecto al otro. Este fenómeno provoca el aumento del consumo de la potencia activa, de las pérdidas, disminución en la eficiencia y aumento del ruido y vibraciones de los MT [56]. En el sistema electroenergético los motores desequilibrados constituyen una sobrecarga para los suministradores de energía y una carga adicional a los consumidores, aumentan las pérdidas de energía en redes y alimentadores y se distorsiona el factor de potencia real [57]. Existen varias formas de calcular el desequilibrio de tensión, siendo la más utilizada la propuesta por la norma NEMA MG1, que establece el cálculo del factor PVU como la relación porcentual entre la máxima diferencia de las tensiones de línea y la tensión promedio, sobre la tensión promedio. Esta norma plantea que el motor comienza a afectarse en su operación cuando el PVU es mayor que 1% y que su operación es inaceptable en condiciones cuando el PVU es mayor a 5% [56]. Los armónicos por su parte, constituyen tensiones o corrientes sinusoidales, cuyas frecuencias son un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema de suministro eléctrico [58]. Este fenómeno es resultado de la distorsión de la forma de onda, provocado por dispositivos y cargas con características no lineales, que son conectados al sistema de potencia. Entre estas cargas no lineales se encuentran los convertidores estáticos de potencia, los dispositivos de descargas en forma de arcos eléctricos, los dispositivos magnéticos saturados y en menor medida, las máquinas rotatorias [59]. Los componentes de un sistema de potencia como los transformadores [60], [61], los cables [59], los capacitores [62], [63], los equipos electrónicos [59], los metrocontadores [64], los desconectivos [65], [66] y los MT [67], [10], son afectados en mayor o menor medida por la presencia de armónicos. En los MT, los principales efectos de las corrientes y tensiones armónicas están

en el aumento del calentamiento y de las pérdidas, así como el incremento del ruido y las vibraciones. Esto trae consigo la disminución de la eficiencia de la máquina, reducción del momento desarrollado, y otros efectos negativos [67], [10]. El efecto de los armónicos en un sistema de potencia se puede evaluar a partir de la determinación de la distorsión armónica total (THD), y el factor de distorsión de tensión (FDT) de tensión y corriente. En la norma IEEE 519 se define los límites de armónicos aceptables en los diferentes niveles de los sistemas eléctricos [58]. El desarrollo y comercialización de los motores de alta eficiencia comenzó en el año 1993 cuando se dio el primer paso en la normalización de los niveles de eficiencia de MT a partir de las disposiciones de la “United States Energy Policy Act” de 1992 (EPA 92) [68]. En el año 2008, se adoptó un sistema de clasificación de eficiencia publicado por la “International Electrotechnical Commission” (IEC) en la norma IEC 60034-30 (International Electrotechnical Commission, 2014). Este sistema de clasificación unificó las definiciones de la “European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics” (CEMEP) y la “National Electrical Manufacturers Association” (NEMA) estableciendo las categorías siguientes [69]: IE1: Standard Efficiency. IE2: High-Efficiency. IE3: Premium Efficiency La categoría IE4 definida como “Super Premium Efficiency” fue agregada en el 2009, y se corresponde generalmente a motores sincrónicos de imanes permanentes, sincrónicos de reluctancia o sincrónicos de reluctancia asistidos por imanes permanentes [70], [71]. En el año 2014, se agregó la categoría IE5 (Ultra Premium Efficiency) [72] aun en desarrollo tecnológico. Los MT con rotor de jaula de ardilla (MTRJA), que son los más utilizados debido a su robustez, fueron los primeros en que se les mejoró algunos elementos técnicos como el núcleo, para alcanzar la categoría de la alta eficiencia EPA 92 (IE2). Posteriormente, se continuó trabajando en la mejora del diseño y la aplicación de nuevas tecnologías como el alargamiento del núcleo, la inyección de la jaula de ardilla en cobre y el recocido de la lámina del rotor entre otros, hasta alcanzar las categorías de eficiencia IE3 [73], [74]. Los MTRJA se han visto limitados para alcanzar las categorías de eficiencia IE4 e IE5. Una de las vías para reducir aún más las pérdidas del motor y aumentar la eficiencia hasta la clase IE4, es la eliminación del devanado del rotor, eliminando así las pérdidas por efecto Joule en este devanado. Esto implica el desarrollo de nuevas tecnologías como la inclusión de imanes permanentes en el rotor o cambiar el concepto de producción de par electromagnético usando el par de reluctancia. A continuación, se describen las características generales de estos tipos de motores [75]. Para aplicaciones de velocidad fija, se desarrolló el motor sincrónico de imanes permanentes de arranque en línea (MSIPAL) [76]. Este motor lleva en el rotor imanes permanentes y una jaula de ardilla, que le permite arrancar directamente con la tensión de la red y luego al rotor entra en sincronismo con el campo del estator. Aunque solo puede operar a la velocidad sincrónica, tiene la ventaja que arrancar con la tensión de línea y puede intercambiarse directamente por un motor tipo MTRJA, pues llevan el mismo tamaño de carcasa. Para aplicaciones de velocidad variable, se desarrollaron los motores sincrónicos de imán permanente (MSIM) [77], los motores sincrónicos de reluctancia (MSR) [78] y los motores de reluctancia conmutada (MRC) [79]. Los MSIM tienen un devanado similar al motor de inducción, pero con imanes en el rotor [77]. Estos pueden ponerse en servicio mediante un variador de frecuencia. En este tipo de motores se estudia la aplicación de nuevos materiales magnéticos enriquecidos para la construcción de los imanes permanentes. Los motores MSR tienen un devanado de estator similar al MTRJA, pero un diseño especial del núcleo del rotor que hace que el campo magnético del estator se enclave con el rotor al ofrecer una reluctancia mínima al campo magnético [78]. Los MRC, aplican un diseño con saliencias en el estator y

el rotor, y no lleva devanado en el rotor [79]. En estos motores, el par se forma por el principio de reluctancia mínima, asimismo para ponerse en operación, el motor necesita ser alimentado con un controlador de potencia para alimentar secuencialmente las bobinas ubicados en las saliencias del núcleo del estator. Otra variante es la combinación de motores MSR y MSIPAL [80]. La tecnología para lograr eficiencias IE5 aún está en desarrollo, y se están enfocando en la migración desde tecnologías que basan su funcionamiento en flujos radiales de campos magnéticos a diseños con flujos axiales, tales como los motores sincrónicos de imanes permanentes con flujo axial [81]–[83]. Un VDV es un dispositivo que regula la velocidad y la fuerza de rotación, o el par de salida de los equipos de accionamiento mecánico. Algunos ejemplos de estos equipos que incorporan tecnología VDV son bombas, ventiladores, compresores y transportadores. Hay muchos tipos de equipos actualmente en uso que necesitan ser reacondicionados porque funcionan de manera ineficiente. Sin embargo, los fabricantes están introduciendo la tecnología VDV para reducir pérdidas en equipos mecánicos [84]. El VDV aumenta la eficiencia al permitir que los motores funcionen a la velocidad ideal para cada condición de carga. En muchas aplicaciones, los VDV reducen el consumo de electricidad del motor en un 30–60% [84]. Casi todos los procesos industriales requieren ajustes para un funcionamiento normal y un rendimiento óptimo. Tales ajustes generalmente se logran con un VDV. Estos dispositivos son una parte importante de la automatización y ayudan a optimizar el proceso al tiempo que reducen los costos de inversión, el consumo de energía, el costo de la energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [1][85]. La mayoría de los motores están diseñados para funcionar a una velocidad constante y proporcionar una salida constante. Los beneficios de aplicar VDV están en las mejoras de productividad y ahorro de energía en bombas, ventiladores, compresores y otros equipos [23]. La instalación de VDV aumenta la eficiencia energética, ahorra consumo de energía, mejora el factor de potencia y la precisión del proceso, el arranque suave y la capacidad de exceso de velocidad. También eliminan los mecanismos de estrangulamiento y las pérdidas por fricción asociadas con las tecnologías mecánicas o electromecánicas de velocidad ajustable y las pérdidas de energía. Otros beneficios de los VDV incluyen prolongar la vida útil del equipo, ajustando la velocidad del motor para cumplir con los requisitos de carga. En general, el ahorro de energía se traduce en ahorro de costos y reducción de las emisiones de GEI para un determinado nivel de producción [84]. Los sistemas VDV típicos constan de tres componentes básicos: el motor eléctrico, el convertidor de potencia y el sistema de control. El motor eléctrico está conectado directa o indirectamente (a través de engranajes) a la carga. El convertidor de potencia controla el flujo de potencia desde un suministro de CA (a menudo a través de un transformador eléctrico) hasta el motor mediante el control apropiado de los interruptores de semiconductores de potencia (parte del convertidor de potencia). La mayoría de los VDV actuales utilizan la modulación de ancho de pulso (PWM) para crear una tensión de salida, corriente y frecuencia variable. Los componentes de los VDV son el rectificador, el regulador y el inversor. Los rectificadores se utilizan para convertir corriente alterna (CA) en corriente continua (CC) [86]. Existen dos topologías principales para las unidades rectificadoras de potencia media: el diodo y los rectificadores IGBT. El rectificador de diodos (también conocido como rectificador no controlado de seis pulsos) es el convertidor de alimentación de CA a CC más comúnmente utilizado para producir una tensión CC fijo. El circuito de alimentación del rectificador consta de seis diodos de alimentación en una configuración de puente trifásico. Esto significa que la tensión del enlace de CC depende completamente de la tensión de alimentación de CA. Los rectificadores de diodos son cargas no lineales y se toma una

corriente no sinusoidal de la línea de alimentación [87]. El regulador controla el VDV, permite el intercambio de datos entre VDV y periféricos, recopila e informa mensajes de falla y lleva a cabo funciones de protección del VDV [87], [88]. Los inversores generan la tensión AC al cambiar secuencialmente la tensión CC en direcciones alternas a través de la carga [89]. Hoy en día, todos los inversores están equipados con componentes con transistores IGBT que sustituye el uso de diodos. El control PWM se usa ampliamente para el control de los interruptores IGBT. El control PWM consiste en encender y apagar rápidamente los interruptores IGBT de tal manera que los pulsos con ancho variable constituyan una forma de onda variable. Otro de los aspectos que serán analizados en el proyecto es la evaluación del funcionamiento de MTs alimentados desde un sistema fotovoltaico. Los SFs están compuestos fundamentalmente por paneles solares, reguladores, inversores y baterías [128] [90]. Estos sistemas, según su aplicación, pueden presentar diferentes configuraciones entre las que se encuentran los Sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA) y los Sistemas fotovoltaicos conectados a la red (SFR) [91]. Los SFA pueden emplearse sin baterías y directamente acoplados a la carga o empleando baterías con autorregulación DC o con controlador de carga con sistema AC. La otra opción del SFA es con SF híbrido que incluye el posible uso de turbinas de viento, turbinas hídricas, celdas de combustible o generador diésel entre otros. La celda solar fotovoltaica (CSF), es el elemento base del SF. Este dispositivo funciona a partir del efecto fotoeléctrico que ocurre en materiales semiconductores al transferirse energía desde el fotón de la luz solar a los electrones libres de los semiconductores. El número de electrones que pueden moverse y generar energía en los semiconductores depende de varios factores como la temperatura, la composición, el campo eléctrico y el campo magnético entre otros [92]. Adicionalmente, el diseño de las CSFs se puede variar mediante el uso de varias capas que puedan capturar mejor los fotones, evitar que la luz se refleje y guiarla para que penetre dentro de la celda, evitar la recombinación, minimizar la resistencia en serie y aumentar la resistencia en paralelo, entre otros factores que permiten aumentar la eficiencia de las CSFs. La característica principal de la CSF para su aplicación es la curva característica I-V en condiciones de iluminación. Dentro de esta curva, los parámetros más importantes son la corriente de corto circuito, la tensión en circuito abierto, la corriente del punto máximo de potencia, la tensión del punto máximo de potencia y el factor de forma o factor de llenado [93]. En un SF, además de la CSF que es el elemento generador de energía, el inversor es el equipo fundamental pues es el que entrega la energía al usuario final, controla el SF y permite la sincronización con la red. Debido a la importancia de este dispositivo se han desarrollado varias investigaciones analizadas en la sección del estado del arte. Los MTs, desde su creación [94], han sido diseñados para operar con tensiones sinusoidales equilibradas cercanas a su valor nominal, por lo tanto, cualquier desviación de esta condición afecta su funcionamiento, aumentan las pérdidas mencionadas y reducen la eficiencia energética [1], [2], [32],[24]. Según lo explicado, la naturaleza variable de generación en los SF y el uso de dispositivos electrónicos, provocan problemas de calidad de la energía como distorsión armónica y desviación de tensión. En el análisis del estado del arte se describen algunos de los estudios que se ha desarrollado sobre el efecto de estos problemas en la operación de los MTs. La evaluación de la factibilidad de medidas de ahorro de energía en el uso de MTs se basa en el cálculo del Período Simple de Recuperación (PSR), el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) o el Costo de Ciclo de Vida (CCV) [95]. El PSR permite determinar el tiempo estimado en que se recupera la inversión. Este método solo emplea los costos de inversión y el valor económico del ahorro de energía ignorando el rendimiento financiero después del período de recuperación. El PSR

es un dato complementario para otros métodos. El VPN es una medida del valor esperado de una inversión que se usa comparativamente entre proyectos de sistemas de motores. El método considera vida útil del motor en años ( $n$ ) y la tasa de interés efectiva ( $i$ ). La TIR, como el PSR, es un dato incluido en el VPN. La TIR indica el rendimiento pagado por una inversión, lo que permite la comparación con el costo de los fondos considerados en el proyecto. El cálculo se realiza igualando el VPN a cero. El CCV es un análisis económico que tiene en cuenta el capital inicial, el mantenimiento, la energía, la depreciación e impacto fiscal, los efectos en la producción, y el valor de la chatarra entre otros costos anuales.

#### **Estado del arte:**

Diferentes estudios han evaluado los MEEE según su nivel de intrusión, los costos de medición y la precisión de los resultados. Lu et al [13], compararon diferentes MEEE, excluyendo los métodos HTEA, considerando el número de parámetros a medir y el nivel de intrusión de las mediciones, las pruebas requeridas para el IM (por ejemplo, sin carga, carga completa, tensión y frecuencia variable, etc.), y el error esperado. La influencia de la operación a cargas parciales y los problemas de calidad energética en los resultados de MEEE no se discutieron en este estudio. Chirindo et al [14] discutieron el comportamiento de las pérdidas por corrientes parásitas y la variación de los parámetros de circuito equivalentes causados por los armónicos, para estimar la eficiencia de MT con el controlador de frecuencia variable. Este estudio solo consideró el uso de métodos HTEA. Hsu et al [15], compararon algunos MEEE sin incluir los métodos HTEA, en función de su principio operativo, el nivel de intrusión de las mediciones y la precisión de los resultados. El estudio también consideró los efectos de la tensión desequilibrada para diferentes factores de carga. Salomon et al [22] también compararon diferentes MEEE, centrándose en el momento en el entrehierro y excluyendo los métodos HTEA. En este estudio, los efectos del desequilibrio de tensión y los armónicos no se incluyeron en la evaluación. Ferreira y Almeida [37] evaluaron el MEEE con menor complejidad, en relación con el equipo de medición y el procesamiento de datos requerido en cada caso. El momento en el entrehierro y los métodos HTEA no se incluyeron en el estudio. Además, la influencia del voltaje desequilibrado, los armónicos no fueron evaluados. Verucchi et al [38] compararon los MEEE normalizados en los MEPS más importantes, evaluando las diferencias en los enfoques utilizados para calcular las pérdidas y su influencia en los resultados. Sin embargo, los MEEE discutidos en este estudio no son aplicables para condiciones de campo. Además, la influencia de la operación de carga parcial, la tensión desequilibrada y los armónicos no se discutieron en el estudio. En un estudio publicado por Sousa et al [2] se discutió la influencia de las condiciones de operación de los MT a cargas parciales, en presencia de armónicos y con desequilibrio de tensión en el error de estimación de eficiencia energética de los MEEE más usado. En este estudio, no se evalúan los métodos en motores de eficiencia IE4, con características constructivas diferentes a los motores de menor nivel eficiencia. Tampoco se evalúan los efectos de la operación a cargas parciales o la alimentación con problemas de calidad de la energía en la eficiencia de este tipo de motores. El uso de VDV's para el control de sistemas de accionamiento es una de las medidas más evaluadas en estudios de ahorro de energía eléctrica. En [129] se hace un análisis general sobre el potencial de ahorro en los sistemas accionados por motores en las industrias de Suecia. Entre las medidas se analiza el potencial de ahorro por el uso de VDV's. El potencial se estima según la relación de la velocidad con el momento y la potencia

mecánica de acuerdo con las leyes de afinidad. Se especifica que esta relación depende de si el sistema es de momento constante (compresores o transportadores) o de momento variable (bombas y ventiladores). Como resultado los autores estiman que con el uso de VDV's se puede ahorrar en promedio un 25% de energía eléctrica. El análisis es general y no incluye el comportamiento a cargas parciales o la influencia de los armónicos generados por falta de datos. En el estudio se estima el ahorro con las leyes de afinidad considerando a la potencia mecánica igual a la potencia eléctrica, sin embargo, su relación es no lineal. En [23] también se realiza una revisión sobre las diferentes formas de ahorrar energía eléctrica en el uso de los MT en el sector industrial a nivel mundial. Entre las acciones analizadas se evalúa el impacto del uso de VDV's. Según los resultados del estudio, con el remplazo de motores convencionales por motores con VDV's en las aplicaciones apropiadas, se puede ahorrar hasta un 41% de energía. En el trabajo se estima el ahorro por el uso de VDV's en una población representativa de los motores usados en Europa. Para la estimación, se suponen diferentes porcentajes de la velocidad sin fundamento técnico y con estos se estimó el porcentaje en el ahorro de la energía aplicando un modelo aproximado generalizado. El método de análisis empleado no tiene en cuenta particularidades de las condiciones reales de operación en los sistemas de motobombas como la capacidad, las condiciones reales de carga y la influencia de las pérdidas adicionales por los armónicos generados. El mismo método se aplica en otros estudios de estimación de ahorro de energía en MT con el uso de VDV's. En [37] se aplica a un edificio industrial de producción de ropa en Bangladesh, en [39] a un hospital público de Malasia, en [40] a un edificio de oficinas en Malasia, en [41] como parte de una revisión sobre el uso de la energía en compresores de aire, y en [42] en un análisis de potencial de ahorro de energía en el uso de MT en el sector industrial de Malasia. En [43] se propone un modelo teórico para la predicción del desempeño energético y determinación del mejor punto de eficiencia enfocado solamente en la bomba. El método tiene como limitantes el uso de datos dimensionales de la bomba de difícil acceso en la práctica y no analiza el motor eléctrico. En [44] se evalúa el impacto en el ahorro de energía de la sustitución de un motor de baja eficiencia operando a velocidad constante por motores de alta eficiencia con VDV's en un sistema de suministro de agua pública. Como resultado se pudo evidenciar un ahorro de energía del 46%. El estudio estuvo limitado porque se evaluaron pocos regímenes de carga, no se evaluó la influencia independiente de los VDV's y no se analizó a profundidad las pérdidas provocadas por los armónicos en el motor. En [45] se propone el uso de VDV's para el control de flujo variable de bombas hidráulicas en un sistema cerrado de un buque marino. Aunque en el estudio se evidencia un ahorro de energía del 56% de todo el sistema, no se evalúa específicamente los parámetros de consumo ni de eficiencia del motor. En [46] se evalúa el potencial de ahorro de energía por el uso de VDV's, mediante la comparación del funcionamiento de un sistema de bombeo descentralizado controlado con VDV's, con un sistema de bombeo centralizado convencional. Los resultados mostraron que el sistema de bombeo descentralizado con VDV's tiene un consumo de energía significativamente menor que el sistema de bombeo centralizado en las mismas condiciones. El análisis se enfoca fundamentalmente en el consumo de energía eléctrica de todo el sistema y el comportamiento de los parámetros hidráulicos, sin evaluar la eficiencia del motor ni los armónicos generados por el VDV's. En [47] se evalúa la exactitud de las mediciones de la frecuencia, la corriente, la tensión y potencia que realizan los VDV's en los motores que controlan. Se analiza, además, la afectación en el rendimiento del sistema de accionamiento de los diferentes controles de tensión (relación lineal, relación cuadrada y un optimizador de flujo). Los resultados del experimento demuestran que el VDV proporciona una frecuencia y corriente precisas, pero

una tensión y potencia imprecisas. Se demuestra, además, que la relación cuadrada da como resultado la mayor eficiencia del sistema de accionamiento. Estos son otros aspectos que debe de tenerse en cuenta durante la evaluación de impacto energético de la operación y control de un sistema de bombeo mediante VDV's. En [48] se analiza la eficiencia del motor y de un VDV en un sistema de bombeo múltiple de velocidad variable simulado en tiempo real. La limitación de este estudio es que se realiza en un ambiente de simulación en Matlab, con modelos de motores aproximados, que no consideran las pérdidas adicionales, ni la influencia de los armónicos en su operación. El principal cambio que implica el uso creciente de FER es en los modos de producción de energía eléctrica que pasa de generarse desde grandes unidades bajo el control de un operador de red a pequeñas unidades conectadas a la red de distribución o a fuentes de energías renovables cuya disponibilidad y producción es muy variable según el comportamiento del clima [96]. En relación a la problemática de la intermitencia, en [51], [97], [98] se proponen sistemas de almacenamiento de energía con bombas hídricas que suple los momentos de interrupción del servicio que ocurre fundamentalmente en los sistemas eólicos (SE) y fotovoltaicos (SF). Las redes de distribución con fuentes renovables, a diferencia de las redes convencionales, tienen un flujo de potencia bidireccional que genera problemas de regulación de tensión. En [52], [99], [100] se evalúa esta problemática y se proponen varios métodos de regulación. La regulación de frecuencia es otro de los problemas que se presentan en sistemas eléctricos de potencia con alta penetración de SF y SE debido a la variabilidad en su generación. Estos problemas son analizados en [101]–[109], donde además se proponen soluciones de regulación y control en sistemas eléctricos de transmisión, distribución y redes inteligentes. Los métodos de diseños y selección de los esquemas de protección en sistemas eléctricos con máquinas sincrónicas convencionales están bien establecidos desde hace mucho tiempo. Sin embargo, con la penetración de FER, han surgido nuevos retos debido a que cambia el nivel de falla y la alimentación es intermitente [110]. Además, se puede incrementar los disparos indeseados de los relés de sobrecorriente en los alimentadores de distribución y su impacto puede llegar a los relés de distancia del sistema de transmisión [111]. Estos nuevos retos con algunas alternativas de solución son analizadas en [110]–[112]. Con la generación distribuida empleando FER se ha evidenciado un deterioro en la calidad de la energía, específicamente un incremento de armónicos en los puntos de acoplamiento común (PCC según las siglas en inglés) producido fundamentalmente por los dispositivos electrónicos de los SF [113]. Además, la instalación de FER en diversos puntos de los sistemas de distribución y su característica variable ha traído consigo otro problema en los operadores de redes denominado inestabilidad armónica [53]. En este sentido diversos estudios como los reportados en [53], [113], [114] han venido trabajando en nuevos modelos de análisis y mecanismo de control para mitigar estos efectos negativos. La potencia reactiva es otro de los parámetros que han sido afectados por la creciente penetración de las FER, específicamente por los convertidores electrónicos de potencia que constituyen la interfaz entre las FER y las redes eléctricas. La reducción de potencia reactiva en el sistema eléctrico de potencia afecta la regulación de la tensión y la estabilidad dinámica y transiente [115]. En este sentido se ha venido investigando en nuevas tecnología que permitan suministrar la potencia reactiva necesaria desde los mismos dispositivos electrónicos que se emplean en la FER [116]–[120]. En [49] y [50] se analizan los sistemas de bombeo de agua solar fotovoltaicos. Estos estudios analizan aspectos importantes como los problemas de la calidad de la energía de los sistemas fotovoltaicos y su afectación en el sistema de bombeo en general, sin embargo, no se enfocan específicamente en la afectación de la eficiencia de los motores.



En resumen, los estudios descritos analizan los problemas generados por las FER enfocado en los sistemas eléctricos de potencia, sin embargo, en ningún caso se evalúa el impacto en la operación de los equipos de uso final, entre ellos, los motores trifásicos de inducción. Además, aunque varios estudios han evaluado la operación de los motores en diferentes escenarios de problemas de calidad de la energía [121], [2], [12], [122]–[127] en ningún caso se ha analizado específicamente su funcionamiento alimentado con FER. En estas condiciones y según los estudios descritos, se pueden presentar problemas que deben de ser analizados como la distorsión armónica, falta de potencia reactiva, mala regulación de tensión e intermitencia en la potencia debido a las condiciones climáticas

#### **Bibliografía:**

1. Y. De la Peña, G. Bordeth, H. Campo, y U. Murillo, Energías limpias una oportunidad para salvar el Planeta, IJMSOR, vol. 3, n.º 1, pp. 21-25, dic. 2018.
2. V. Sousa Santos, J. J. Cabello Eras, A. Sagastume Gutierrez, and M. J. Cabello Ulloa, “Assessment of the energy efficiency estimation methods on induction motors considering real-time monitoring,” Meas. J. Int. Meas. Confed., vol. 136, pp. 237–247, 2019.
3. Ç. Acar, O. C. Soygenc, and L. T. Ergene, “Increasing the Efficiency to IE4 Class for 5.5 kW Induction Motor Used in Industrial Applications,” Int. Rev. Electr. Eng., vol. 14, no. 1, p. 67, Feb. 2019.
4. P. Waide and C. U. Brunner, “Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems,” Cedex, Fr. Int. Energy Agency, p. 132, 2011.
5. Siemens AG, “Minimum Energy Performance Standards,” 2016.
6. B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap

torque with considerations of condition monitoring,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 6, pp. 1666–1674, 2008.

7. M. C. Di Piazza and M. Pucci, “Techniques for efficiency improvement in PWM motor drives,” Electr. Power Syst. Res., vol. 136, pp. 270–280, 2016.

8. A. G. Siraki and P. Pillay, “An in situ efficiency estimation technique for induction machines working with unbalanced supplies,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 27, no. 1, pp. 85–95, 2012.

9. C. P. Salomon, W. C. Sant’Ana, G. Lambert-Torres, L. E. Borges Da Silva, E. L. Bonaldi, and L. E. D. L. De Oliveira, “Comparison among methods for induction motor low-intrusive efficiency evaluation including a new AGT approach with a modified stator resistance,” Energies, vol. 11, no. 4, 2018.

10. V. S. Santos, P. R. V. Felipe, J. R. G. Sarduy, N. A. Lemozy, A. Jurado, and E. C. Quispe, “Procedure for determining induction motor efficiency working under distorted grid voltages,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 30, no. 1, 2015.

11. B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 42, no. 4, pp. 924–933, 2006.

12. M. Chirindo, M. A. Khan, and P. S. Barendse, “Considerations for Nonintrusive Efficiency Estimation of Inverter-Fed

Induction Motors,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 2, pp. 741–749, 2016.

13. J. S. Hsu et al., “Comparison of Induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no. 1, pp. 117–125, 1996.

14. J. R. Holmquist, J. A. Rooks, and M. E. Richter, “Practical Approach for Determining Motor Efficiency in the Field Using Calculated and Measured Values,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 1, pp. 242–248, 2004.

15. M. O. Adissi, A. C. Lima Filho, R. D. Gomes, D. M. G. B. Silva, and F. A. Belo, “Implementation and Deployment of an Intelligent Industrial Wireless System for Induction Motor Monitoring,” J. Dyn. Syst. Meas. Control, vol. 139, no. 12, p. 124502, 2017.

16. B. Lu, D. B. Durocher, and P. Stemper, “Online and nonintrusive continuous motor energy and condition monitoring in process industries,” in Conference Record of 2008 54th Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2008, pp. 18–26.

17. J. O. Ojo, V. Ostovic, T. A. Lipo, and J. C. White, “Measurement and computation of starting torque pulsations of salient pole synchronous motors,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 5, no. 1, pp. 176–182, 1990.

18. B. Lu, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "A nonintrusive efficiency estimation method for in-service motor testing using a

modified induction motor equivalent circuit," in 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2006, pp. 1–6.

19. B. Herndler, P. Barendse, and M. A. Khan, "Considerations for improving the non-intrusive efficiency estimation of induction machines using the air gap torque method," 2011 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2011, no. 1, pp. 1516–1521, 2011.

20. U. V Anbazhagu, J. S. Praveen, and R. Soundarapandian, "A Proficient Approach for Monitoring Induction Motor by

Integrating Embedded System with Wireless Sensor Network," vol. 7, no. November, pp. 174–179, 2014.

21. M. M. Stopa, M. A. Saldanha, A. A. Luiz, L. M. R. Baccarini, and G. A. M. Lacerda, "A Simple Torque Estimator for In-Service

Efficiency Determination of Induction Motors," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 54, no. 5, pp. 4967–4976, 2018.

22. L. M. R. Baccarini, G. F. V. Amaral, and G. A. M. Lacerda, "Simple robust estimation of load torque in induction machines

for application in real plants," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 99, no. 9–12, pp. 2695–2704, 2018.

23. R. Saidur, "A review on electrical motors energy use and energy savings," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 14, no. 3, pp.

877–898, Apr. 2010.

24. Quintero Coronel, D., Lenis Rodas, Y., & Corredor Martínez, L. (2018). Desarrollo de un modelo de gasificación en equilibrio químico para evaluar el potencial energético del cuesco en plantas extractoras de aceite de palma en Colombia. INGE CUC, 14(2), 62-70. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.2.2018.06>

25. J. R. Gómez, E. C. Quispe, M. A. De Armas, and P. R. Viego, "Estimation of induction motor efficiency in-situ under

unbalanced voltages using genetic algorithms," Proc. 2008 Int. Conf. Electr. Mach. ICEM'08, pp. 25–28, 2008.

26. V. Sousa, P. R. Viego, J. R. Gomez, E. C. Quispe, and M. Balbis, "Estimating induction motor efficiency under no-controlled

conditions in the presences of unbalanced and harmonics voltages," in CHILECON 2015 - 2015 IEEE Chilean Conference on

Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, Proceedings of IEEE Chilecon 2015, 2016,

pp. 567–572.

27. V. Sousa Santos, P. Viego Felipe, and J. Gómez Sarduy, "Bacterial foraging algorithm application for induction motor field

efficiency estimation under unbalanced voltages," Measurement, vol. 46, no. 7, pp. 2232–2237, Aug. 2013.

28. V. Sousa Santos, P. Viego Felipe, and J. Gómez Sarduy, "Bacterial foraging algorithm application for induction motor field

efficiency estimation under unbalanced voltages," Meas. J. Int. Meas. Confed., vol. 46, no. 7, pp. 2232–2237, 2013.

29. O. Avalos, E. Cuevas, and J. Gálvez, "Induction Motor Parameter Identification Using a Gravitational Search Algorithm,"

Computers, vol. 5, no. 2, p. 6, 2016.

30. G. S. Grewal and B. S. Rajpurohit, "Comparison of efficiencies of in situ induction motor in unbalanced field conditions,"

Proc. 2015 IEEE Int. Conf. Power Adv. Control Eng. ICPACE 2015, no. Im, pp. 70–74, 2015.

31. C. P. Salomon et al., "A stator flux synthesis approach for torque estimation of induction motors using a modified stator

resistance considering the losses effect," Proc. 2013 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2013, no. 1, pp. 1369–1375,

2013.

32. F. García Reina, A. Méndez García, y L. Martínez Ibáñez, «Determinación de las propiedades dielectricas de los combustibles, sus mezclas y del suelo, así como su impacto en un uso eficiente de los recurso energéticos y en la determinación de la contaminación ambiental», IJMSOR, vol. 4, n.º 1, jun. 2019. <https://doi.org/10.17981/ijmsor.04.01.04>

33. D. P. de Carvalho et al., "A method for real-time wireless monitoring of the efficiency and conditions of three-phase

induction motor operation," Electr. Power Syst. Res., vol. 157, pp. 70–82, 2018.

34. F. J. T. E. Ferreira and A. T. De Almeida, "Considerations on in-field induction motor load estimation methods," Proc. 2008

Int. Conf. Electr. Mach. ICEM'08, pp. 1–8, 2008.

35. C. Verucchi, C. Ruschetti, and F. Benger, "Efficiency Measurements in Induction Motors: Comparison of Standards," IEEE

Lat. Am. Trans., vol. 13, no. 8, pp. 2602–2607, 2015.

36. R. Saidur and T. M. I. Mahlia, “Energy, economic and environmental benefits of using high-efficiency motors to replace

standard motors for the Malaysian industries,” *Energy Policy*, vol. 38, no. 8, pp. 4617–4625, 2010.

37. M. A. Habib, M. Hasanuzzaman, M. Hosenuzzaman, A. Salman, and M. R. Mehadi, “Energy consumption, energy saving

and emission reduction of a garment industrial building in Bangladesh,” *Energy*, vol. 112, pp. 91–100, 2016.

38. M. Hasanuzzaman, N. A. Rahim, R. Saidur, and S. N. Kazi, “Energy savings and emissions reductions for rewinding and

replacement of industrial motor,” *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 233–240, 2011.

39. R. Saidur, M. Hasanuzzaman, S. Yogeswaran, H. A. Mohammed, and M. S. Hossain, “An end-use energy analysis in a

Malaysian public hospital,” *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 4780–4785, 2010.

40. R. Saidur, “Energy consumption, energy savings, and emission analysis in Malaysian office buildings,” *Energy Policy*, vol.

37, no. 10, pp. 4104–4113, 2009.

41. R. Saidur, N. A. Rahim, and M. Hasanuzzaman, “A review on compressed-air energy use and energy savings,” *Renew.*

*Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 4, pp. 1135–1153, 2010.

42. R. Saidur, N. A. Rahim, H. W. Ping, M. I. Jahirul, S. Mekhilef, and H. H. Masjuki, "Energy and emission analysis for industrial

motors in Malaysia," *Energy Policy*, vol. 37, no. 9, pp. 3650–3658, 2009.

43. M. Liu, L. Tan, and S. Cao, "Theoretical model of energy performance prediction and BEP determination for centrifugal

pump as turbine," *Energy*, vol. 172, pp. 712–732, Apr. 2019.

44. P. van Rhyn and J. H. C. Pretorius, "Utilising high and premium efficiency three phase motors with VFDs in a public water

supply system," in *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*,

2015, vol. 2015-Sept, pp. 497–502.

45. C.-L. Su, Chi-Hsiang Liao, Tso-Chu Chou, Min-Hung Chou, and J. M. Guerrero, "Variable flow controls of closed system

pumps for energy savings in maritime power systems," in *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2016, pp.

1–8.

46. M. Liu, R. Ooka, W. Choi, and S. Ikeda, "Experimental and numerical investigation of energy saving potential of centralized

and decentralized pumping systems," *Appl. Energy*, vol. 251, no. May, p. 113359, Oct. 2019.

47. G. Wang and Z. Han, "Investigation of the accuracy of VFD analog output data and the energy performance of different



voltage controls in a VFD-motor-belt-fan system,” *Energy Build.*, vol. 194, pp. 260–272, Jul. 2019.

48. V. K. A. Shankar, S. Umashankar, S. Paramasivam, and H. Norbert, “Real time simulation of Variable Speed Parallel

Pumping system,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2102–2108, Dec. 2017.

49. V. K. A. Shankar, S. Umashankar, P. Sanjeevikumar, L. Mihet-Popa, V. Fedák, and V. K. Ramachandaramurthy, “Power

Quality Performance Analysis of grid tied PV fed Parallel Pumping System under Normal and Vibrating Condition,” *Energy Procedia*, vol. 145, pp. 497–503, Jul. 2018.

50. G. Li, Y. Jin, M. W. Akram, and X. Chen, “Research and current status of the solar photovoltaic water pumping system – A

review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. December 2016, pp. 440–458, Nov. 2017.

51. M. Basu, “Optimal generation scheduling of hydrothermal system with demand side management considering uncertainty

and outage of renewable energy sources,” *Renew. Energy*, 2019.

52. M. Dib, M. Ramzi, and A. Nejmi, “Voltage regulation in the medium voltage distribution grid in the presence of renewable

energy sources,” in *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 13, pp. 739–745.

53. J. B. Kwon, X. Wang, F. Blaabjerg, C. L. Bak, A. R. Wood, and N. R. Watson, “Harmonic instability analysis of a single-phase

grid-connected converter using a harmonic state-space modeling method,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 52, no. 5, pp.

4188–4200, 2016.

54. M. Anwari and A. Hiendro, “New unbalance factor for estimating performance of a three-phase induction motor with

under-and overvoltage unbalance,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, no. 3, pp. 619–625, 2010.

55. A. von Jouanne and B. Banerjee, “Assessment of voltage unbalance,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 16, no. 4, pp. 782–790,

2001.

56. NEMA, “ANSI/NEMA MG 1-2016 . Motors and Generators,” 2016.

57. Duarte Forero, J., Guillín Estrada, W., & Sánchez Guerrero, J. (2018). Desarrollo de una metodología para la predicción del volumen real en la cámara de combustión de motores diésel utilizando elementos finitos. INGE CUC, 14(1), 122-132. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.11>

58. IEEE Power and Energy Society, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Power and Energy Society, vol. 2014. 2014, pp. 5–9.

59. IEEE, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, vol. 1992, no.

June. 1993.

60. M. Digalovski, K. Najdenkoski, and G. Rafajlovski, "Impact of current high order harmonic to core losses of three-phase

distribution transformer," in IEEE EuroCon 2013, 2013.

61. M. T. Bishop, J. F. Baranowski, D. Heath, and S. J. Benna, "Evaluating harmonic-induced transformer heating," IEEE Trans.

Power Deliv., 1996.

62. C. Boonseng, R. Boonseng, N. Boonsaner, V. Kinnares, P. Apiratikul, and K. Kularbphetpong, "Partial Discharge Phenomena

in Power Capacitor Unit Insulation Under Harmonic Resonance Effects," in Lecture Notes in Electrical Engineering, 2020.

63. C. Boonseng, C. Chompoo-inwai, V. Kinnares, K. Nakawiwat, and P. Apiratikul, "Failure analysis of dielectric of low voltage

power capacitors due to related harmonic resonance effects," in Proceedings of the IEEE Power Engineering Society

Transmission and Distribution Conference, 2001.

64. R. Milankov and M. Radic, "Harmonics: Examples of negative impacts," in 2014 16th International Conference on

Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014, pp. 435–438.

65. W. A. Elmore, C. A. Kramer, and S. E. Zocholl, "Effect of Waveform Distortion on Protective Relays," IEEE Trans. Ind. Appl.,

1993.

66. J. F. Fuller and D. J. Roesler, "Influence of harmonics on power distribution system protection," IEEE Trans. Power Deliv.,

1988.

67. Ching-Yin Lee and Wei-Jen Lee, "Effects of nonsinusoidal voltage on the operation performance of a three-phase induction

motor," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 14, no. 2, pp. 193–201, Jun. 1999.

68. D. R. Williams and L. Good, Guide to the Energy Policy Act of 1992. United States: Fairmont Press, Inc., Liburn, GA (United

States), 1994.

69. International Electrotechnical Commission, "IEC 60034-30-1:2014 Rotating Electrical Machines: Efficiency Classes of Line

Operated AC Motors," p. 50, 2014.

70. P. R. Viego Felipe, J. R. Gómez Sarduy, and E. C. Quispe Oqueña, "Synchronous reluctance motors controlled by variable

frequency converters: an application to save energy.," Ing. Energética, vol. 36, no. 1, pp. 72–82, 2015.

71. Abb, "Low voltage IE4 synchronous reluctance motor and drive package for pump and fan applications," 2013.

72. A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and A. Q. Duarte, "Technical and Economical Considerations on Super High-Efficiency

Three-Phase Motors,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 2, pp. 1274–1285, Mar. 2014.

73. I. Peter, G. Scutaru, and C. G. Nistor, “Manufacturing of asynchronous motors with squirrel cage rotor, included in the

premium efficiency category IE3 at S.C. Electroprecizia Electrical-Motors S.R.L. Sacele,” in 2014 International Conference on

Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2014, 2014.

74. L. Alberti, N. Bianchi, A. Boglietti, and A. Cavagnino, “Core axial lengthening as effective solution to improve the induction

motor efficiency classes,” IEEE Trans. Ind. Appl., 2014.

75. A. T. De Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and G. Baoming, “Beyond induction motors - Technology trends to move up

efficiency,” IEEE Trans. Ind. Appl., 2014.

76. ABB, “General purpose motor catalog.” 2018.

77. M. Zigliotto, “Permanent magnet synchronous motor drives,” in Power Electronic Converters and Systems: Frontiers and

Applications, 2016.

78. S. Taghavi and P. Pillay, “A Sizing Methodology of the Synchronous Reluctance Motor for Traction Applications,” IEEE J.

Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 2, no. 2, pp. 329–340, Jun. 2014.

79. K. M. Rahman, B. Fahimi, G. Suresh, A. V. Rajarathnam, and M. Ehsani, "Advantages of switched reluctance motor

applications to EV and HEV: design and control issues," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 111–121, 2000.

80. P. R. Viego, V. Sousa, J. R. Gómez, and E. C. Quispe, "Direct-on-line-start permanent-magnet-assisted synchronous

reluctance motors with ferrite magnets for driving constant loads," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 651–659,

2020.

81. C. Zhang, K. J. Tseng, and G. Zhao, "Comparison of axial flux PM synchronous motor and induction motor by mathematical

and finite element analysis," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, 2011.

82. S. Neethu, S. P. Nikam, B. G. Fernandes, S. Pal, and A. K. Wankhede, "Radial-and Axial-Flux Synchronous Motors for HighSpeed Low-Power Applications," in *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2018*, 2018.

83. A. Cavagnino, M. Lazzari, F. Profumo, and A. Tenconi, "A comparison between the axial flux and the radial flux structures

for PM synchronous motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2002.

84. R. Saidur, S. Mekhilef, M. B. Ali, A. Safari, and H. A. Mohammed, "Applications of variable speed drive (VSD) in electrical

motors energy savings," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 543–550, Jan. 2012.

85. M. H. Rashid, Power Electronics Handbook. 2007.
86. K. Sueker, Power electronics design: a practitioner's guide. Newnes, 2005.
87. S. Mustaffah and S. Azma, "Variable speed drives as energy efficient strategy in pulp and paper industry," University Technology Malaysia, 2006
88. L. Jayamaha, Energy-efficient building systems: green strategies for operation and maintenance. New York: McGraw-Hill Professional, 2006.
89. A. Brodgesell, R. D. Buchanan, J. B. Rishel, B. G. Lipták, R. H. Osman, and I. H. Gibson, "Variable-speed drives," in Instrument Engineers Handbook, Fourth Edition: Process Control and Optimization, 2005.
90. P. Mohanty, T. Muneer, and M. Kolhe, Solar Photovoltaic System Applications, First. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
91. L. Hernández-Callejo, S. Gallardo-Saavedra, and V. Alonso-Gómez, "A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance," Sol. Energy, vol. 188, no. June, pp. 426–440, 2019.
92. R. F. Pierret, Modular series on solid state devices. Volume I: Semiconductor fundamentals. Addison-Wesley Publishing

Company, 1983.

93. Tiwari, G.N. and S. Dubey, *Fundamentals of Photovoltaic Modules and their Applications*. Royal Society of Chemistry, 2010.

94. P. L. Alger and R. E. Arnold, "The History of Induction Motors in America," *Proc. IEEE*, vol. 64, no. 9, pp. 1380–1383, 1976.

95. J. L. Devore, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 8th ed. San Luis Obispo, 2010.

96. S. Rönnberg and M. Bollen, "Power quality issues in the electric power system of the future," *Electr. J.*, vol. 29, no. 10, pp.

49–61, 2016.

97. J. I. Pérez-Díaz and J. Jiménez, "Contribution of a pumped-storage hydropower plant to reduce the scheduling costs of an

isolated power system with high wind power penetration," *Energy*, vol. 109, pp. 92–104, 2016.

98. J. I. Pérez-Díaz, M. Chazarra, J. García-González, G. Cavazzini, and A. Stoppato, "Trends and challenges in the operation of

pumped-storage hydropower plants," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 767–784, 2015.

99. M. A. Azzouz, H. E. Farag, and E. F. El-Saadany, "Real-time fuzzy voltage regulation for distribution networks incorporating

high penetration of renewable sources," *IEEE Syst. J.*, vol. 11, no. 3, pp. 1702–1711, 2017.



100. García-Guarín, P., Cantor-López, J., Cortés-Guerrero, C., Guzmán-Pardo, M., & Rivera, S. (2019). Implementación del algoritmo VNS-DEEPSO para el despacho de energía en redes distribuidas inteligentes. INGE CUC, 15(1), 142-154.  
<https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.1.2019.13>

101. C. X. Mu, J. X. Jin, and W. Xu, "Adaptive frequency regulation strategy based integral sliding mode control for smart grid

with renewable energy sources," 2015 IEEE Int. Conf. Appl. Supercond. Electromagn. Devices, ASEMD 2015 - Proc., pp.

391–392, 2016.

102. S. Zhang, Y. Mishra, and M. Shahidehpour, "Utilizing distributed energy resources to support frequency regulation

services," Appl. Energy, vol. 206, pp. 1484–1494, Nov. 2017.

103. B. Jie, T. Tsuji, and K. Uchida, "Analysis and modelling regarding frequency regulation of power systems and power

supply–demand-control based on penetration of renewable energy sources," J. Eng., vol. 2017, no. 13, pp. 1824–1828, 2017.

104. A. Habib, C. Sou, H. M. Hafeez, and A. Arshad, "Evaluation of the effect of high penetration of renewable energy sources

(RES) on system frequency regulation using stochastic risk assessment technique (an approach based on improved

cumulant)," Renew. Energy, vol. 127, pp. 204–212, Nov. 2018.

104. A. Habib, C. Sou, H. M. Hafeez, and A. Arshad, "Evaluation of the effect of high penetration of renewable energy sources

(RES) on system frequency regulation using stochastic risk assessment technique (an approach based on improved

cumulant),” *Renew. Energy*, vol. 127, pp. 204–212, Nov. 2018.

105. Z. X. Tang, Y. S. Lim, S. Morris, J. L. Yi, P. F. Lyons, and P. C. Taylor, “A comprehensive work package for energy storage

systems as a means of frequency regulation with increased penetration of photovoltaic systems,” *Int. J. Electr. Power Energy*

*Syst.*, vol. 110, pp. 197–207, Sep. 2019.

106. Y. Ye, Y. Qiao, and Z. Lu, “Revolution of frequency regulation in the converter-dominated power system,” *Renew.*

*Sustain. Energy Rev.*, vol. 111, pp. 145–156, Sep. 2019.

107. D. H. Tungadio and Y. Sun, “Load frequency controllers considering renewable energy integration in power system,”

*Energy Reports*, vol. 5, pp. 436–453, Nov. 2019.

108. J. W. Shim, G. Verbic, N. Zhang, and K. Hur, “Harmonious integration of faster-acting energy storage systems into

frequency control reserves in power grid with high renewable generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp.

6193–6205, 2018.

109. H. R. Kermani, M. V. Dahraie, and H. R. Najafi, “Frequency control of a microgrid including renewable resources with

energy management of electric vehicles,” 4th Iran. Conf. Renew. Energy Distrib. Gener. ICREDG 2016, pp. 114–118, 2016.

110. S. M. Brahma and A. A. Girgis, "Development of Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems with High Penetration of Distributed Generation," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 19, no. 1, pp. 56–63, 2004.

111. V. Telukunta, J. Pradhan, A. Agrawal, M. Singh, and S. G. Srivani, "Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 365–379.

112. Hoyos Velasco, F., Candelo, J., & Silva Ortega, J. (2018). Rendimiento de un Inversor DC-AC controlado con ZAD-FPIC. INGE CUC, 14(1), 9-18.  
<https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.01>

113. X. Liang and C. Andalib-Bin-Karim, "Harmonics and Mitigation Techniques Through Advanced Control in Grid-Connected Renewable Energy Sources: A Review," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 54, no. 4, pp. 3100–3111, 2018.

114. J. Kwon, X. Wang, C. L. Bak, and F. Blaabjerg, "The modeling and harmonic coupling analysis of multiple-parallel connected inverter using Harmonic State Space (HSS)," in 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015, 2015, pp. 6231–6238.

115. M. N. I. Sarkar, L. G. Meegahapola, and M. Datta, "Reactive power management in renewable rich power grids: A review of grid-codes, renewable generators, support devices, control strategies and optimization Algorithms," IEEE Access, vol. 6, pp.

41458–41489, 2018.

116. R. Kabiri, D. G. Holmes, B. P. McGrath, and L. G. Meegahapola, “LV Grid Voltage Regulation Using Transformer Electronic

Tap Changing, with PV Inverter Reactive Power Injection,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, pp.

1182–1192, 2015.

117. B. Zhang, P. Hou, W. Hu, M. Soltani, C. Chen, and Z. Chen, “A Reactive Power Dispatch Strategy with Loss Minimization

for a DFIG-Based Wind Farm,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 914–923, 2016.

118. Y. Shen, M. Cui, Q. Wang, F. Shen, B. Zhang, and L. Liang, “Comprehensive reactive power support of DFIG adapted to

different depth of voltage sags,” *Energies*, vol. 10, no. 6, 2017.

119. Á. Molina-García, R. A. Mastromauro, T. García-Sánchez, S. Pugliese, M. Liserre, and S. Stasi, “Reactive Power Flow

Control for PV Inverters Voltage Support in LV Distribution Networks,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 447–456,

2017.

120. T. K. S. Freddy, J.-H. Lee, H.-C. Moon, K.-B. Lee, and N. A. Rahim, “Modulation Technique for Single-Phase

Transformerless Photovoltaic Inverters with Reactive Power Capability,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 9, pp.

6989–6999, 2017.

121. J. G. Rueda-Bayona, A. Guzmán, J. J. C. Eras, R. Silva-Casarín, E. Bastidas-Arteaga, and J. Horrillo-Caraballo, “Renewables

energies in Colombia and the opportunity for the offshore wind technology,” *J. Clean. Prod.*, vol. 220, pp. 529–543, 2019.

122. E. El-Kharashi, J. G. Massoud, and M. A. Al-Ahmar, “The impact of the unbalance in both the voltage and the frequency

on the performance of single and cascaded induction motors,” *Energy*, vol. 181, pp. 561–575, Aug. 2019.

123. A. Kalair, N. Abas, A. R. Kalair, Z. Saleem, and N. Khan, “Review of harmonic analysis, modeling and mitigation

techniques,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 78, pp. 1152–1187, 2017.

124. P. Donolo, M. Pezzani, G. Bossio, E. C. Quispe, D. Valencia, and V. Sousa, “Impact of Voltage Waveform on the Losses

and Performance of Energy Efficiency Induction Motors,” in *2018 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2018 - Conference*

*Proceedings*, 2018, pp. 20–23.

125. E. C. Quispe, I. D. López, F. J. T. E. Ferreira, and V. Sousa, “Unbalanced voltages impacts on the energy performance of

induction motors,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 1412–1422, 2018.

126. E. C. Quispe, X. M. Lopez-Fernandez, A. M. S. Mendes, A. J. Marques Cardoso, and J. A. Palacios, “Influence of the positive

sequence voltage on the derating of three-phase induction motors under voltage unbalance,” in Proceedings of the 2013 IEEE

International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2013, 2013, no. 100, pp. 100–105.

127. Duarte-Forero, J., Berrio-Orozco, K., & Guzmán-Fruto, A. (2019). Caracterización de un sistema de adquisición de datos para un banco de prueba de Motor Diésel Monocilíndrico. INGE CUC, 15(1), 155-167.  
<https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.1.2019.14>

128. M. Nuñez, J. Correa, G. Herrera, P. Gómez, S. Morón, y N. Fonseca, Estudio de percepción sobre energía limpia y auto sostenible, IJMSOR, vol. 3, n.º 1, pp. 11-15, dic. 2018. <http://ijmsoridi.com/index.php/ijmsor/article/view/89>

[129.](#) M. J. S. Zuberi, A. Tjink, and M. K. Patel, “Techno-economic analysis of energy efficiency improvement in electric motor driven systems in Swiss industry,” Appl. Energy, vol. 205, no. January, pp. 85–104, Nov. 2017.

130. G. S. Grewal and B. Singh, “Efficiency determination of in-service induction machines using gravitational search

optimization,” Meas. J. Int. Meas. Confed., vol. 118, no. October 2017, pp. 156–163, 2018.